

3. 3 断層帯周辺における地震動予測の高度化のための研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層帯周辺における地震動予測の高度化のための研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人 東京大学地震研究所	教授	額 額 一 起
国立大学法人 東京大学地震研究所	助教	三 宅 弘 恵
国立大学法人 東京大学地震研究所	学振特別研究員	石 瀬 素 子

(c) 業務の目的

サブテーマ1および2で得られた成果を基に、神縄・国府津－松田断層帯における震源断層モデルと地下構造モデルを構築し、断層帯周辺域における地震動予測の高度化を図る。

(d) 3ヵ年の年次実施計画

1) 平成21年度：

神縄・国府津－松田断層帯周辺の地下構造に関する既存の資料の収集と整理を行った。また、平成22年度以降に実施を予定している地下構造モデル化のための手法について検討した。さらに、既存の強震観測網で得られた地震記録を用いて対象領域の地下構造の地域性についての調査を実施した。

2) 平成22年度：

サブテーマ1および2による成果および文献より震源断層モデルに関する資料収集を行った。また、中小地震の地震動シミュレーションにより、既存の地下構造モデルを神縄・国府津－松田断層帯の強震動予測のためのモデルとして使用することに対する検討を行った。

3) 平成23年度：

サブテーマ1および2で得られた知見に基づいて神縄・国府津－松田断層帯における震源断層モデルを構築し、断層帯周辺域の強震動評価を実施した。

(2) 平成21～23年度の成果

(a) 業務の要約

神縄・国府津－松田断層帯周辺を対象に、震源断層モデルと地下構造モデルを構築し、強震動予測を実施した。震源断層モデルに関しては、サブテーマ1および2で得られた知見および既往の調査観測に基づき、国府津－松田断層と関東地震の震源断層の東側が同時破壊する地震シナリオを作成した。地下構造モデルは、対象地域の三次元地下構造に関する既存資料の収集とその整理、中小地震に対する地震動シミュレーションを行い、局所的なモデル修正の必要性について検討した。加えて、既存の強震観測点で得られた地

震動の面的分布を調査することにより、対象地域の地震動の地域性の把握に努めた。以上の構築された震源断層モデルと地下構造モデルに基づき、ハイブリッド法による広帯域地震動予測を行った。断層破壊が、関東地震の震源断層の東側から始まり、国府津－松田断層に移り進んでいくケースなどを検討し、海溝型地震と内陸地震の両者の震源の特徴が反映された、新しい強震動予測を実施した。

(b) 業務の成果

1) 震源断層モデルの構築

神縄・国府津－松田断層帯における強震動予測のための震源モデル作成に向け、本断層帯の位置や断層面の形状等、震源モデルの構築にかかわる情報収集を行った。参考にした主な資料は、地震調査研究推進本部地震調査委員会による活断層の長期評価（地震調査研究推進本部地震調査委員会，1997；2005；2009）および全国地震動予測地図（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2008；2009；2010）である。長期評価に基づいて作成された全国地震動予測地図では、神縄・国府津－松田断層帯は、海域におけるその存在も考慮されている（表1・図1）。

ここでは、上記に加えてサブテーマ1および2で得られた知見に基づき、強震動予測の対象として、内陸地震である国府津－松田断層帯と海溝型地震である関東地震の震源断層の東側の両者の組み合わせによる震源断層モデルを構築した。国府津－松田断層については、神縄・国府津－松田断層帯周辺における重点的な調査観測平成22年度成果報告書（文部科学省研究開発局，2011）に、関東地震の震源断層の東側についてはSato et al. (2005) に基づいている。その際、三次元地下構造モデルにおける、フィリピン海プレート形状等を考慮して断層面を設定した。また、関東地震の震源断層の東側と国府津－松田断層が同時破壊する震源断層モデルとなるよう、1923年関東地震の破壊開始点と第1アスペリティ、およびすべり角に変更を加えた。その結果、破壊開始点は1923年関東地震の東側のアスペリティの深い場所に変更し、西側のアスペリティのすべりは除いた。この理由は、関東地震の断層面が分岐断層となった際に、分岐の両者が破壊するのではなく、国府津－松田断層帯の分岐部分のみを破壊するシナリオ設定による。また、すべり角は国府津－松田断層帯との同時破壊の可能性を考慮し、国府津－松田断層帯と同じ90度と、1923年関東地震と同じ135度の二種類を考慮したが、最終的に90度を採用した。構築された震源断層モデルを図2に、強震動予測レシピ（Irikura and Miyake, 2011）に準拠して設定された断層パラメータを表2に示す。

2) 地下構造モデルの構築

強震動予測に使用する地下構造モデル作成のため、神縄・国府津－松田断層帯を含む地域で実施された地下構造調査結果の収集を行った。具体的には、東海～南関東地域において実施された屈折法地震探査、反射法地震探査、ボーリング調査、速度検層などの地下構造に関するデータおよび文献を収集した。

これらの調査結果がコンパイルされた三次元地下構造モデルの一つとして、地震調査研究推進本部地震調査委員会により公表された長周期地震動予測地図2012年試作版の付録である全国1次地下構造モデル（暫定版）（Koketsu et al., 2008）がある。この

モデルは、Koketsu et al. (2009) による地下構造の標準的なモデル化手法に則り、堆積層・地殻構造・プレートや付加体を含む海域構造が、強震動予測を目的した形でチューニングされている。また、神縄・国府津－松田断層帯に影響が大きい相模湾の構造について、山中・山田(2002)の三次元地下構造モデルが反映されている。

ここでは、神縄・国府津－松田断層帯周辺域における強震動予測に向けた準備として、図3に示される全国1次地下構造モデルを対象に、中小規模地震の観測波形の再現性によって地下構造モデルの評価を実施した。具体的な手順は、①地震動のシミュレーションに使用する地震の選定、②震源メカニズムの選択、③観測波形の再現性の評価、である。

神縄・国府津－松田断層帯近傍で発生し、かつ観測機録が多数の観測点で得られている中小地震である、2001年12月8日の神奈川県西部の地震(M_{JMA} 4.6)をシミュレーションに使用する地震として選定した。この地震に対する気象庁の初動解およびF-netのCMT解のうち、震源近傍の硬質な地盤上にある観測点での波形の再現性のより良いものを震源モデルのメカニズムとして決定した。観測波形には、①後続動が少ない、②S波初動部分が明瞭、という特徴が見られるが、これらをより良く再現した気象庁による初動解を震源モデルのメカニズムとして採用した。

対象領域に位置する25観測点(図4参照)について、三次元差分法(Pitarka, 1999)を用いて地震波伝播の計算を行い、周期2秒から8秒の時刻歴波形とスペクトルの再現性から地下構造モデルを評価した。その結果、観測波形の再現性には地域性が見られた。図5に示した通り、TKY007をはじめとする関東平野に位置する観測点では、観測波形が良く再現された。一方、相模湾の北西湾岸と相模湾(領域1)に位置するSZ0009、KNG003、KNG005、KNG007、KNG010、KNG013、KNG206および木更津周辺(領域2)のCHB015、CHB017、CHB019、CHB022、CHB030において計算値が観測地を下回り、波形のよい再現性は得られず、中小地震の震源モデルの調整に加え、領域1、2および震源から両領域までの地下構造モデルを将来的に修正する必要があることが示された。

3) 強震観測による当該地域における地震動の地域性の検討

既存の強震観測網で得られた中規模地震の地震記録を基に、神縄・国府津－松田断層帯周辺域における地震動の地域性の検討を行った。神縄・国府津－松田断層帯が位置する南関東の太平洋沿岸地域には、関東地震や想定東海地震などの相模・駿河・南海トラフ沿いに繰り返し発生する地震に備え、多くの強震観測点が設置されている。本業務では、同地域に展開されている東京大学地震研究所の強震観測網の観測点で得られた強震記録(東京大学地震研究所強震観測データベース, <http://smsd.eri.u-tokyo.ac.jp/smad/>)の面的分布を調べることにより、地震動の地域性について検討した。

図6に2009年伊豆半島東方沖の地震(M_w 4.9、2009年12月18日)で記録された伊豆半島周辺地域の最大加速度分布を示す。太平洋沿岸部と足柄平野の中央部においてより強い地震動が励起されており、この分布は、微地形区分に基づく表層地盤増幅率の分布(J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>)と概ね対応している。図7には、2009年駿河湾の地震(M_w 6.3、2009年8月11日)で得られた神縄・国府津－松田断層帯近傍での震度分布と速度波形の東西成分を示す。足柄平野中央部に位置する観測点では、

強い揺れが比較的長く継続しており、平野の中央部ほど継続時間が長くなっている。また、揺れの強さを比較すると、断層面の直上の山間部の観測点で平野部の観測点で得られた揺れよりも強い地震動が励起された観測点が見られ、同様の傾向が伊豆半島東方沖の地震でも観測されている。

一方、既存の強震観測網で得られた神縄・国府津－松田断層帯周辺で発生した最大震度6強を記録した静岡県東部の地震（2012年3月15日、M6.0）の地震記録を基に、当該地域における地震動の地域性を調査した（図8）ところ、足柄平野の中央部よりも縁辺部において強い揺れが励起されていたことが示された。

このように、地震規模や地震波の入射方向によって、神縄・国府津－松田断層帯周辺域における地震動の地域性が異なる可能性が示唆された。

4) 神縄・国府津－松田断層帯周辺域における強震動予測

構築した震源断層モデルと地下構造モデルに基づき、周期0.1～20秒の帯域において、Pitarka (1999)の差分法と壇・佐藤(1998)の統計的グリーン関数法を用いたハイブリッド法による広帯域地震動予測を行った。ハイブリッド法における接続周期は2秒である。関東地震の震源断層の東側の震源断層モデルについては、Sato et al. (2005)の震源インバージョン結果を用い、国府津－松田断層の震源断層モデルについては、北部セグメントと南部セグメントから成る内陸地震型の特性化震源モデルを構築した。

複数の震源を同時破壊させる場合は、それぞれの震源の地震モーメントを足すカスケードモデルあるいは、それぞれの断層面積を足してから地震モーメントを算出するスケーリングモデルのいずれかが採用されることが多い。ここでは、プレート境界地震である関東地震の震源断層の東側と内陸地震である国府津－松田断層の組み合わせであり、両者を混ぜた震源断層のスケーリング則が確立されていないことから、カスケードモデルによる強震動予測を行った。

広帯域地震動計算においては、長周期成分と短周期成分の時刻歴波形を工学的基盤で合成し、計測震度を算出した。その後、藤本・翠川(2006)に対する工学的基盤から地表の震度増分値を加味して、地表の計測震度を算出した。

図9および図10に、関東地震の震源断層の東側と国府津－松田断層の同時破壊、関東地震の震源断層の東側のみ、国府津－松田断層のみをシナリオ地震とした広帯域地震動予測結果を示す。同時破壊の予測結果では、小田原から横浜にかけて高震度域が生じており、小田原周辺、三浦半島、館山付近で特に震度が高い結果となった。ただし、地表震度の計算は、非線形効果が含まれていないため、大きな誤差を含む可能性がある。関東地震の東側部分では、アスペリティ直上における揺れが大きい結果となったが、国府津－松田断層部分は、破壊が北西に進行する地震シナリオを反映して、破壊進行方向で揺れが大きくなる結果となった。また、時刻歴波形より、主に関東地震の断層面からの寄与と考えられる長周期地震動が関東平野内で有意に励起されることが確認された。

(c) 結論ならびに今後の課題

神縄・国府津－松田断層帯周辺域における強震動予測に向け、震源断層と地下構造のモデル化を進めた。震源断層モデルの構築については、本プロジェクトで得られた成果と既

存モデルについての情報収集を行った。地下構造モデルの構築については、全国1次地下構造モデルを、対象領域における強震動予測に使用することに対する検討を行った。その結果、地域的にモデルの修正が必要であることが示された。また、神縄・国府津－松田断層帯周辺域における強震記録を調査し、地震動の地域性が異なる可能性が示唆された。

以上の成果を基に、神縄・国府津－松田断層帯周辺域における強震動予測を実施した。国府津－松田断層が関東地震の震源断層の東側と同時に破壊する地震シナリオを構築し、三次元地下構造モデルを用いた強震動予測を行った。断層破壊が、関東地震の震源断層の東側の断層面から始まり、国府津－松田断層に移り進化するケースなどを検討し、海溝型地震と内陸地震の両者の震源の特徴が反映された、新しい強震動予測を試みた。

予測結果では、小田原から横浜にかけて高震度域が生じており、小田原周辺、三浦半島、館山付近で特に震度が高い結果となった。また、時刻歴波形より、主に関東地震の断層面からの寄与と考えられる長周期地震動が関東平野内で有意に励起されることが確認された。

今後の課題として、同時破壊の震源断層モデル構築の際に、カスケードモデル（いわゆる連動）のみならずスケーリングモデルも検討する必要がある。また、国府津－松田断層と関東地震の断層走向が異なるため、破壊の乗り移りに不連続が生じているが、これらを解消する方法として、プレート形状や活断層情報に基づく屈曲あるいは曲面断層の導入が望ましい。また、神縄・国府津－松田断層帯周辺の地下構造構築に関する既存の調査資料やデータおよび本業務における強震観測から、本対象領域における地震動には地域性があることが明らかになった。強震動予測のための地下構造モデル化の際、これらを利活用することが望ましい。

(d) 引用文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会，神縄・国府津－松田断層帯の調査結果と評価について，1997.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会，神縄・国府津－松田断層帯の調査結果と評価の一部改訂について，2005.
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会，神縄・国府津－松田断層帯の調査結果と評価の一部改訂について，2009.
- 4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会，全国を概観した地震動予測地図 2008年版，2008.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会，全国地震動予測地図 2009年版，2009.
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会，全国地震動予測地図 2010年版，2010.
- 7) 文部科学省研究開発局，神縄・国府津－松田断層帯周辺における重点的な調査観測平成22年度成果報告書，2011.
- 8) Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara and S. Harder, Earthquake source fault beneath Tokyo, Science, 309, 462-464, 2005.
- 9) Irikura, K. and H. Miyake, Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, Pure Appl. Geophys., 168, 85-104, 2011.
- 10) Koketsu, K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto, Progress towards a Japan

integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. S10-038, 2008.

- 11) Koketsu K., H. Miyake, Afnimar, Y. Tanaka, A proposal for a standard procedure of modeling 3-D velocity structures and its application to the Tokyo metropolitan area, Japan, Tectonophysics, 290-300, 2009.
- 12) 山中浩明・山田伸之, 微動アレイ観測による関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築, 物理探査, 55, 53-65, 2002.
- 13) Pitarka, A., 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, Bull. Seismol. Soc. Am., 89, 54-68, 1999.
- 14) 壇一男・佐藤俊明, 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 509, 49-60, 1998.
- 15) 藤本一雄・翠川三郎, 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 6(1), 11-22, 2006.

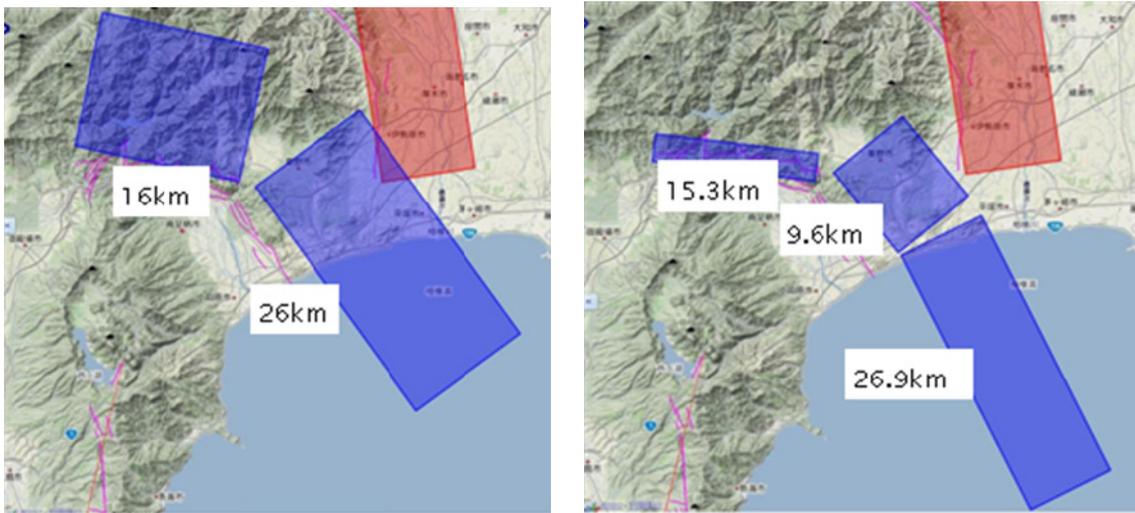


図1 地震調査研究推進本部地震調査委員会の全国地震動予測地図による神縄・国府津－松田断層帯の断層モデル。青色の矩形が断層面を地表に投影した領域に対応する。(左)2008および2009年度版、(右)2010年度版。

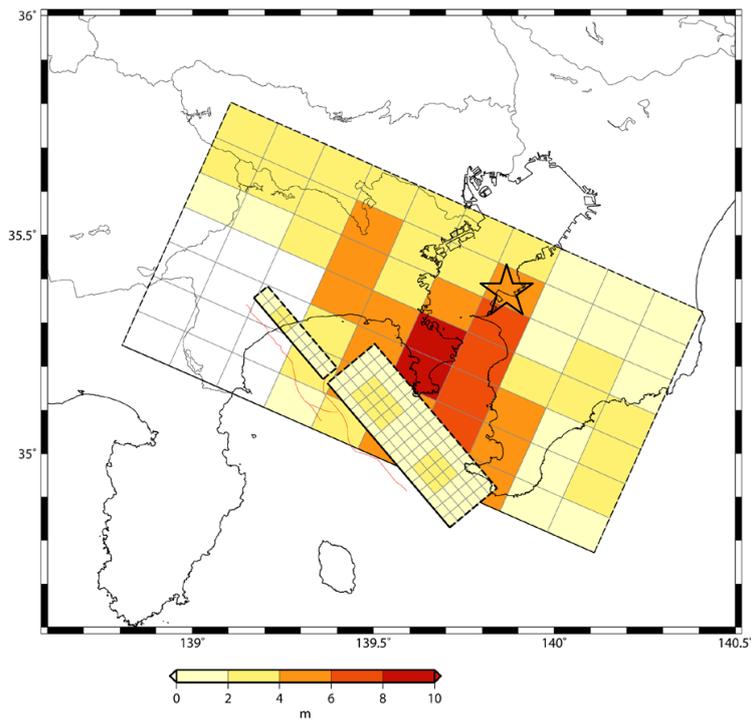


図2 本強震動予測で構築した国府津－松田断層帯および関東地震の東側の震源断層モデル。星は破壊開始点を示す。

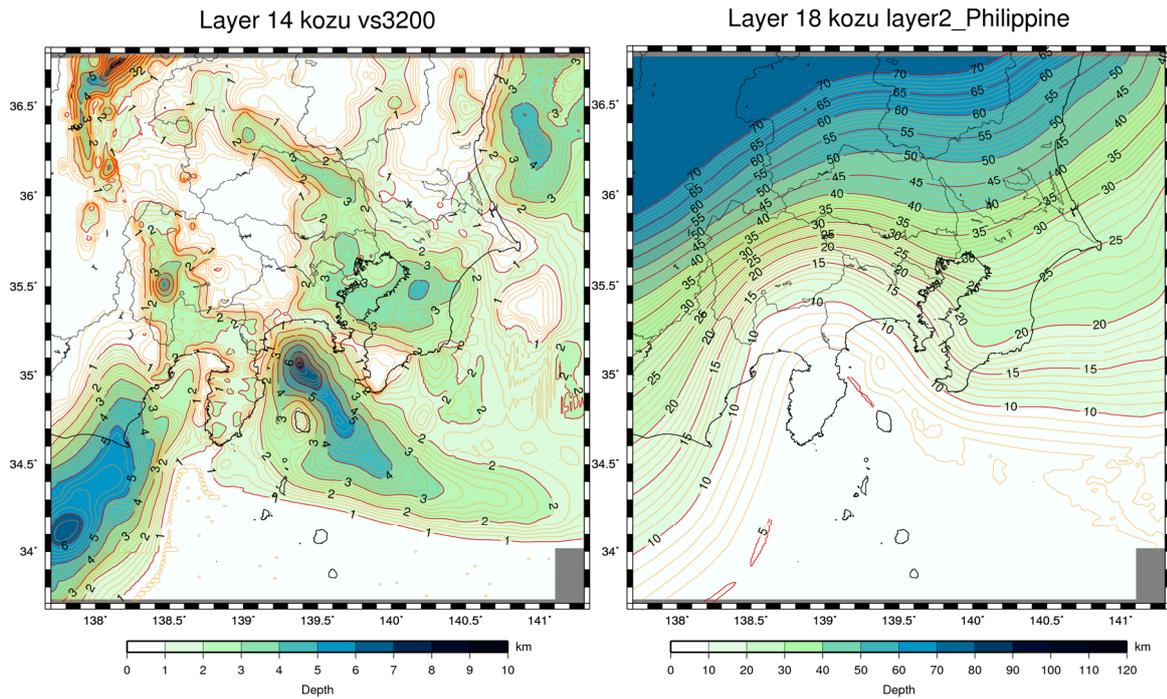


図3 強震動予測の対象領域における全国1次地下構造モデルの地震基盤深度（左）とフィリピン海プレート上面深度分布（右）。

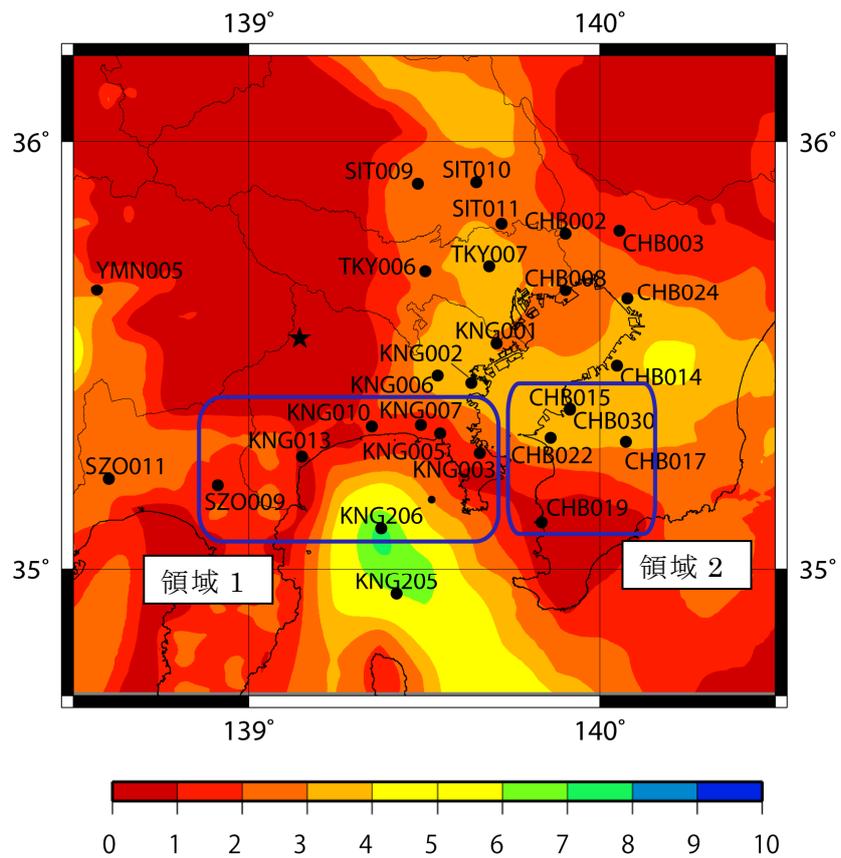


図4 地震動シミュレーションにより観測波形の再現性を評価した観測点分布。図中のコンターは地震基盤上面（S波速度が3.2 km/s）の深度を示す。

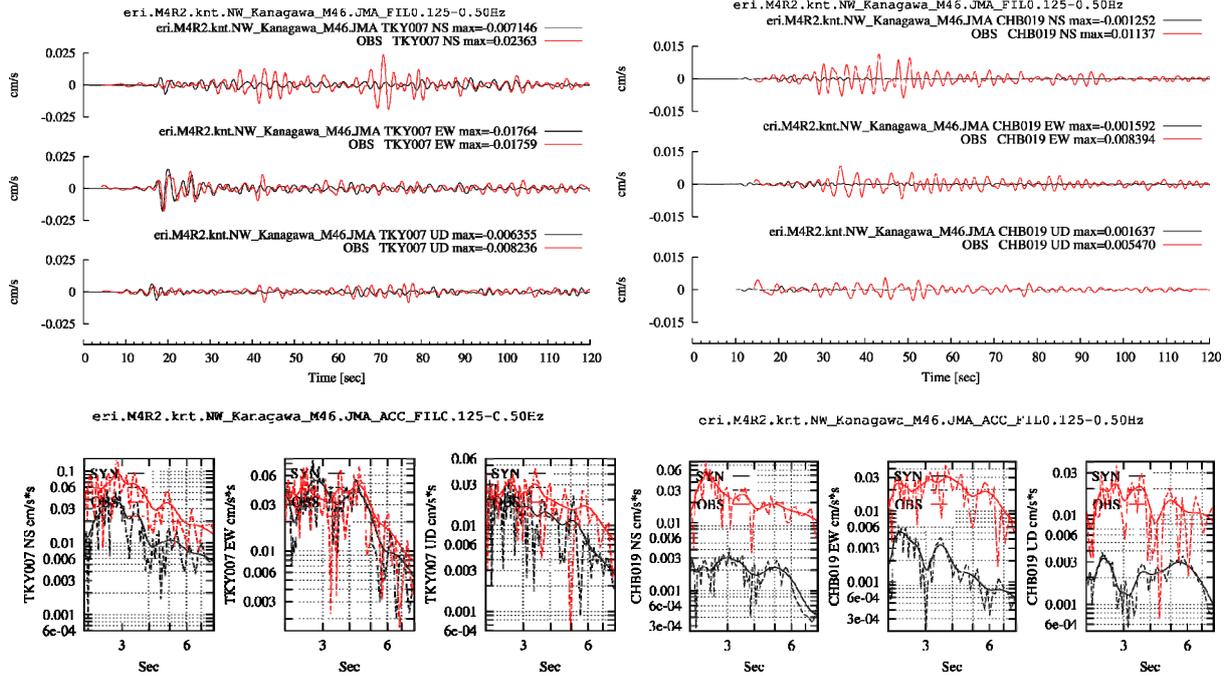


図5 図4の領域外に位置するTKY007 (K-NET 新宿) (左) および図4の領域2に位置するCHB019 (K-NET 鋸南) (右) における地震動シミュレーションの結果。それぞれ、赤が観測記録、黒が計算値を示す。(上段)速度波形。上から南北、東西、上下成分。(下段)フーリエスペクトル。実線は0.05 HzのParzenウィンドウで平滑化したスペクトル。左から南北、東西、上下成分。TKY007では、観測波形が比較的良く再現されているが、CHB019では、計算波形が過大となっている。

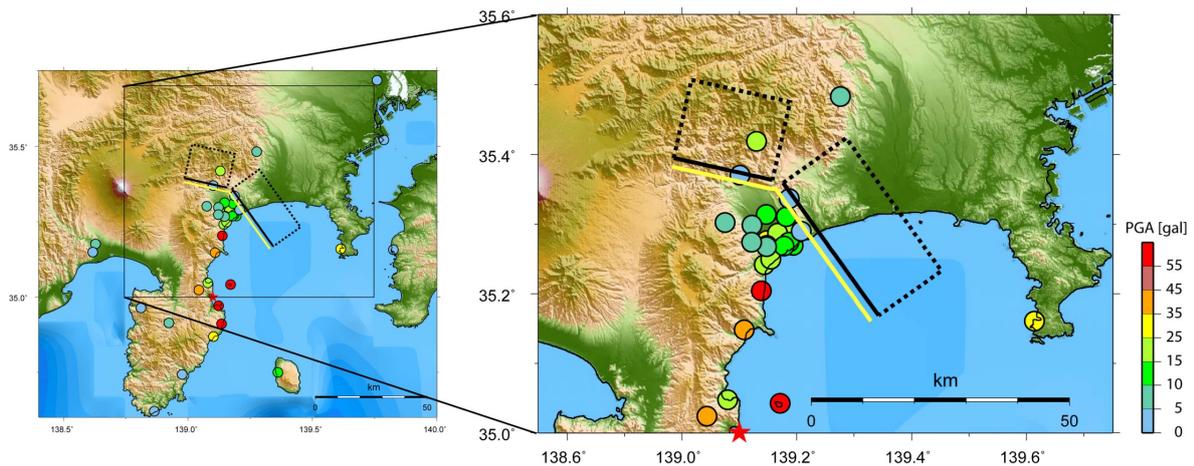


図6 2009年12月18日の伊豆半島東方沖の地震（ M_w 4.9）の際、東京大学地震研究所の強震観測網で得られた地表の最大加速度分布。赤色の星は震央を示す。断層トレースと断層面の地表投影は、全国地震動予測地図（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2009）でモデル化された神縄・国府津－松田断層帯の位置と形状に基づく。

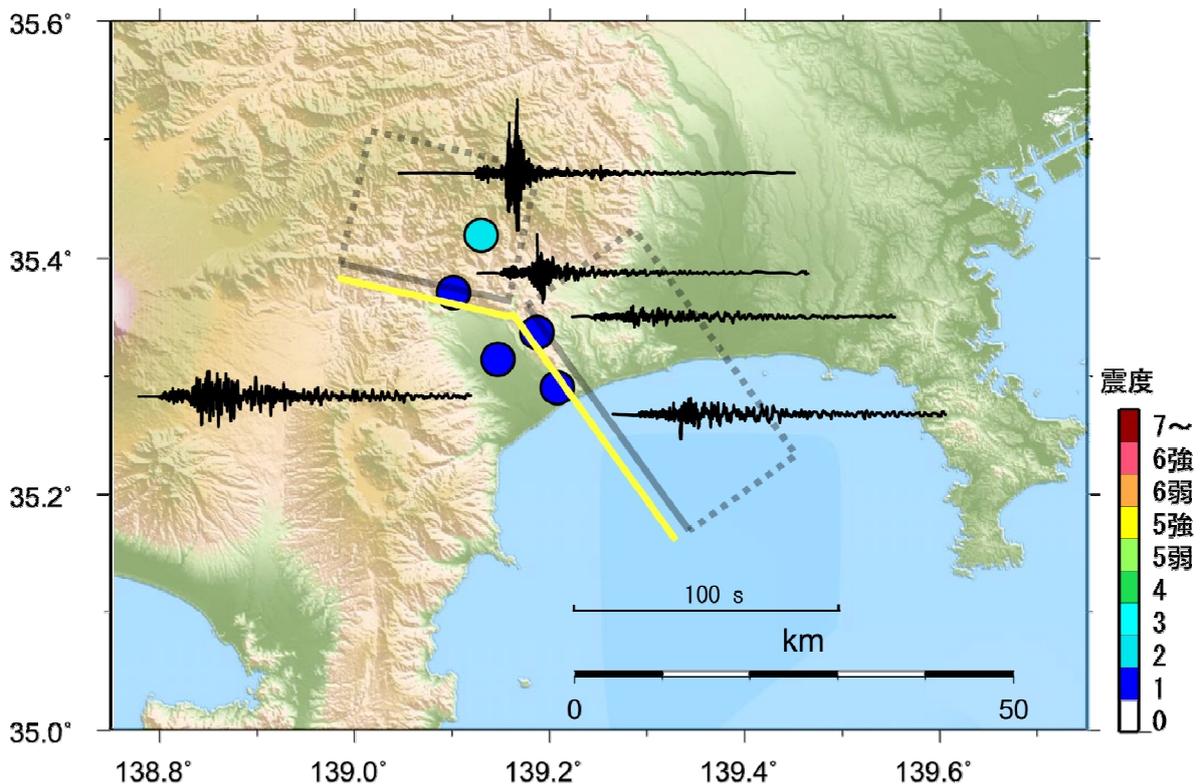


図7 2009年8月11日の駿河湾の地震（ M_{jMA} 6.5, M_w 6.3）の際、東京大学地震研究所の強震観測点で得られた足柄平野における地表の震度相当値分布と速度波形（東西成分）。断層トレースと断層面の地表投影は、全国地震動予測地図（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2009）でモデル化された神縄・国府津－松田断層帯の位置と形状に基づく。

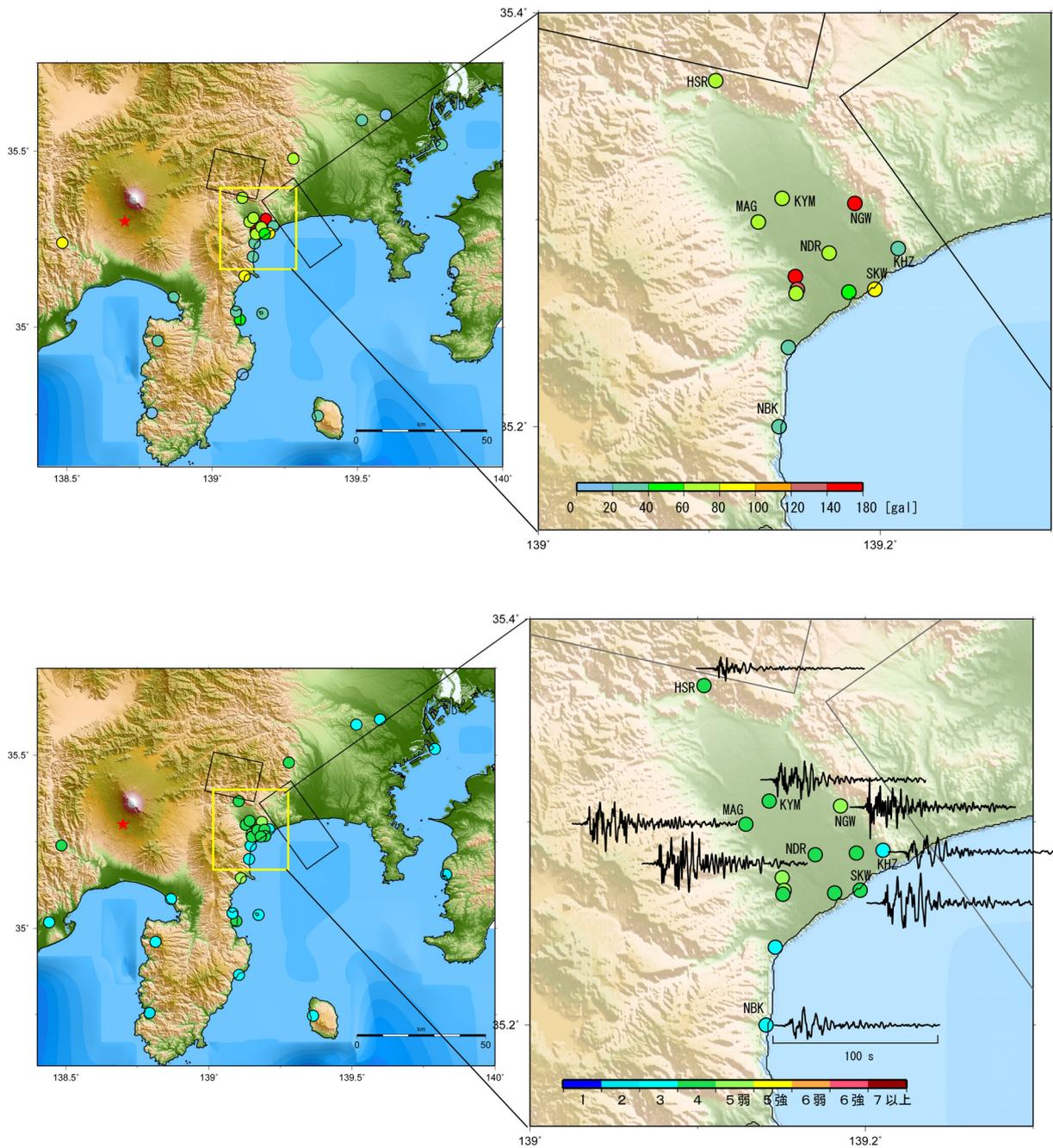


図8 2011年3月15日の静岡県東部の地震 (M_{JMA} 6.4, M_w 5.9) の際、東京大学地震研究所の強震観測点で得られた足柄平野における地表の最大加速度分布 (上) および震度相当値分布と変位波形の南北成分 (下)。赤色の星は震央を示す。断層トレースと断層面の地表投影は、全国地震動予測地図 (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2009) でモデル化された神縄・国府津-松田断層帯の位置と形状に基づく。

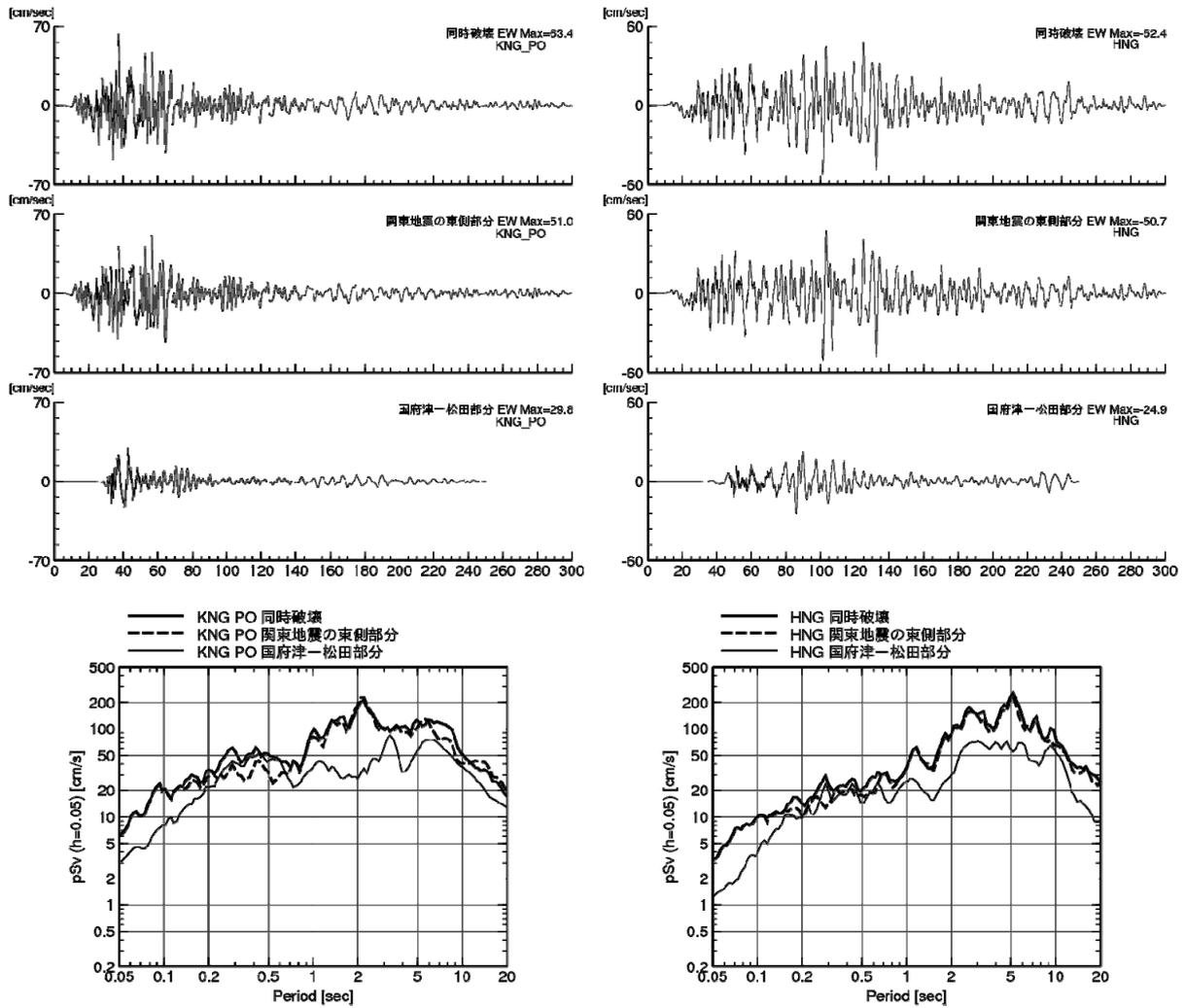


図9 神奈川県庁(左)と本郷(右)の工学的基盤における詳細法による強震動予測結果。上から速度波形・5%疑似速度応答スペクトル。

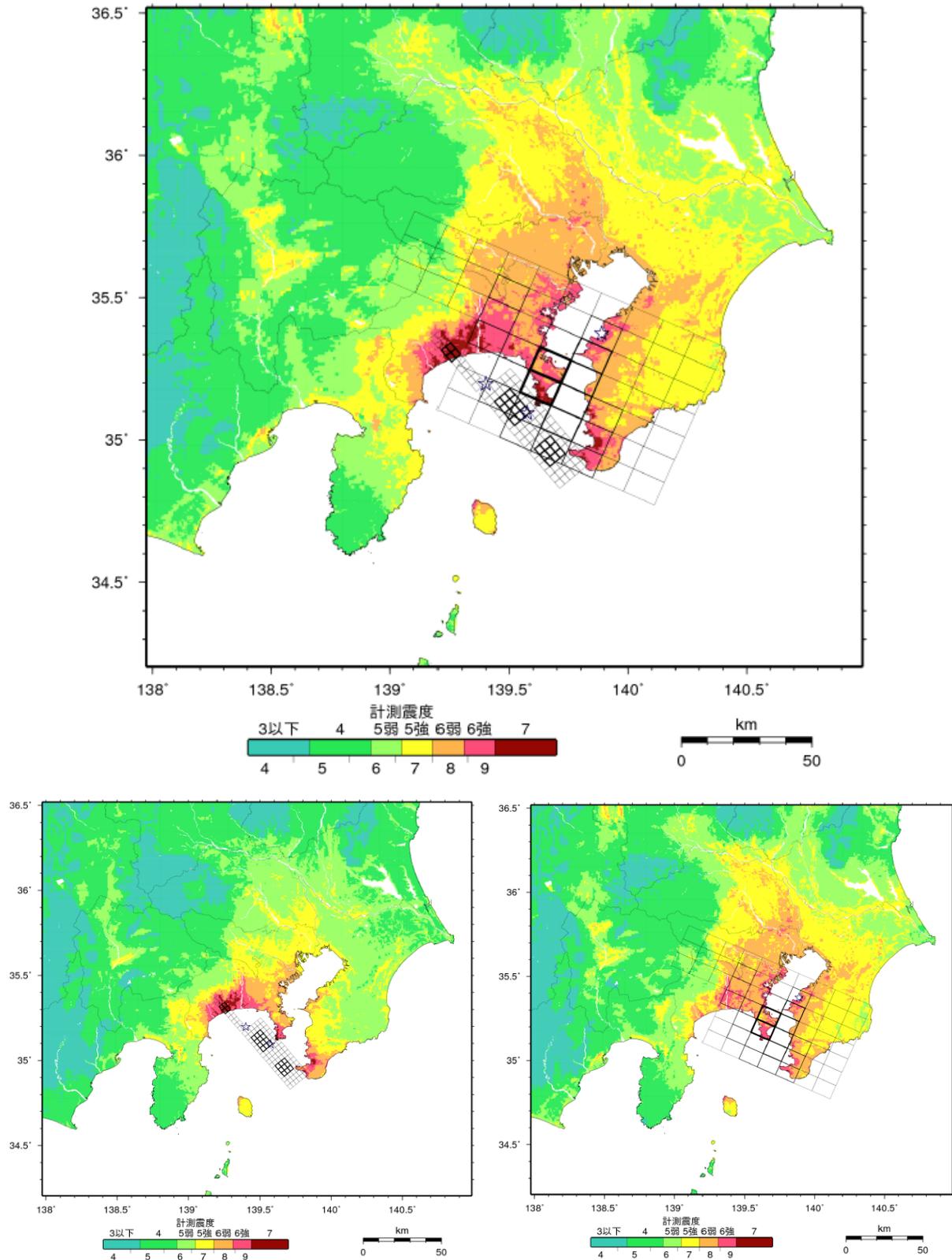


図 10 詳細法による強震動予測から算出された地表の計測震度分布。上：関東地震の震源断層の東側と国府津－松田断層の同時破壊。左下：国府津－松田断層のみ、右下：関東地震の震源断層の東側のみ、震度階は上段が気象庁震度、下段が改正メルカリ震度。震源断層モデルは図 2 を用いており、太線の矩形はアスペリティ、星は破壊開始点を示す。

表1 地震調査研究推進本部地震調査委員会（2008, 2009, 2010）の全国地震動予測地区による神縄・国府津－松田断層帯の断層パラメータ

	No. Segment	基準(日本測地系)		上端 [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向	傾斜	Mw
2008年 度版	1	138.984	35.374	3	15.3	10	97	105	7.5
	2	139.171	35.364	3	9.6	13	140.7	130	
	3	139.241	35.294	3	26.9	13	153.2	130	
2009年 度版	1	139.151	35.357	3	15.3	10	277	75	7.5
	2	139.238	35.297	3	9.6	13	320.7	50	
	3	139.374	35.078	3	26.9	13	333.2	50	
2010年 度版	1	139.158	35.363	2	16	18	282.3	45	6.9
	2	139.343	35.169	2	26	16	324	40	

表2 本強震動予測で構築した国府津－松田断層帯の断層パラメータ

	北側	南側
原点	東経 139.36070 北緯 35.170715	東経 139.71137 北緯 34.830013
原点深さ (km)	2	2
断層下端深さ (km)	5.9 (= 2 + 6 sin40)	11 (= 2 + 18 sin30)
走向 (degree)	320	320
傾斜 (degree)	40	30
すべり角 (degree)	90	90
断層面積 (km ²)	162 (長さ 27 km×幅 6 km)	864 (長さ 48 km×幅 18 km)
総断層面積 S (km ²)		1,026
静的応力降下量 $\Delta\sigma_c$ (MPa)	3.1 (Fujii and Matsu'ura, 2000)	
地震モーメント M_0 (Nm)	5.9E+19	
モーメントマグニチュード M_w	7.1	
剛性率 μ (N/m ²)	3.1E+10* ¹	
平均すべり量 D (m)	1.85	

※全国1次地下構造モデルの第15層の物性 (密度 2.7g/cc, S波速度 3.4km/s)

	北側	南側
アスペリティ		
面積 S_a (km ²)	36 (= 0.22 S)	189 (= 0.22 S)
平均すべり量 D_a (m)	3.7 (= 2.0 D)	
地震モーメント M_{0a} (Nm)	2.58E+19	
応力降下量 $\Delta\sigma_a$ (MPa)	14.1 (= $\Delta\sigma_c * S / S_a$)	
個数	1	2
ライズタイム (s)	1 (= $W_a / 2V_r$)	1.5 (= $W_a / 2V_r$)
背景領域		
面積 S_b (km ²)	126	675
地震モーメント M_{0b} (Nm)	3.32E+19	
平均すべり量 D_b (m)	1.34	
実効応力 σ_b (MPa)	3.1 (= 0.22 * $\Delta\sigma_a$)	
ライズタイム (s)	1 (= $W/2V_r$)	3 (= $W/2V_r$)
f_{max} (Hz)	6	6